

# Kostenvergleich einer innovativen Zugvollständigkeitskontrolle

## A cost comparison of innovative train integrity control

Alessa Eckert | Florian Brinkmann | Benedikt Scheier

Im Innovationsprogramm für Leit- und Sicherungstechnik des Joint Undertaking Shift2Rail werden innovative Systeme zur Zugvollständigkeitskontrolle entwickelt, welche auf Achszähler oder Gleisstromkreise verzichten. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) hat hierzu eine Untersuchung der Auswirkungen auf die Lebenszykluskosten (Life Cycle Costs – LCC) vorgenommen. Die Kosten wurden den Einsparpotenzialen durch den Wegfall infrastrukturseitiger Komponenten gegenübergestellt. Weiterhin wurde mittels einer mikroskopischen Eisenbahnbetriebssimulation untersucht, welche Auswirkungen sich durch das Fahren im Moving Block ergeben.

### 1 Zielsetzung

Ziel dieses Beitrags ist es, den im Shift2Rail-Projekt X2Rail-2 durchgeführten Kostenvergleich der Zugvollständigkeitsprüfung mit streckenseitiger Infrastruktur und On-Board Zugintegritätslösungen (On-Board Train Integrity – OTI) zu beschreiben.

Zwei verschiedene Effekte der zugseitigen Integritätsprüfung wurden genauer betrachtet: Kosten werden durch den Wegfall von Infrastrukturelementen (Achszähler, Gleisstromkreise) reduziert und Auswirkungen auf die Kapazität durch die Möglichkeit des Fahrens im Moving-Block-Abstand sind zu erwarten. Zusätzlich berücksichtigt dieser Beitrag die Kosten der Implementierung der OTI-Technologie auf vorhandene Züge. Von einer Kostenbetrachtung der OTI-Technologie für neue Züge oder Güterwagen wird abgesehen, da deren Kostenzusammensetzung nicht abgeschätzt werden kann.

Die Bewertung beruht auf zwei Referenzszenarien:

- Korridore mit einer geringen Zugdichte und
- Korridore mit einer hohen Zugdichte.

Für Korridore mit geringer Zugdichte wird analysiert, in welchem Verhältnis die Ausrüstungskosten zu den Kosten stehen, die durch den Abbau streckenseitiger Infrastruktur eingespart werden können.

In Korridoren mit hoher Zugdichte wird zusätzlich zum Kostenvergleich der Nutzen der Kapazitätserhöhung durch mikroskopische Simulation ermittelt. Die Kapazitätssteigerung wird jedoch nicht monetarisiert, da diese Effekte von jedem Bahnbetreiber gewichtet werden müssen.

### 2 Szenarien und Methodik

Die Analyse wird auf der Grundlage realer Infrastrukturdaten durchgeführt. Der Schwerpunkt im Szenario mit geringer Zugdichte liegt auf der Verlagerung der Zugintegritätstechnologie. Dies führt zu einer Reduzierung der Infrastrukturkosten durch den Wegfall streckenseitiger Ausrüstung und damit verbundenen Wartungs-, Energie- und

Innovative systems for on-board train integrity control are being developed in the Shift2Rail joint undertaking's innovation program for advanced traffic management & control systems for the purpose of reducing the numbers of trackside axle counters or track circuits. The German Aerospace Center (DLR) has conducted a study of the life cycle costs (LCC). The expected costs have been compared with the potential savings achieved by eliminating these infrastructure components. Furthermore, a simulation model has been used to investigate the effects on capacity, if the new technology allows moving block operations.

### 1 The aim

The aim of this paper is to explain the cost comparison of train integrity verification with trackside infrastructure and on-board units as has been performed in the Shift2Rail project X2Rail-2.

There are two different kinds of effects for the on-board train integrity (OTI) technology under evaluation: costs will be affected as infrastructure elements (axle counters, track circuits) become obsolete and capacity effects can be expected due to the option of using moving block operations. Additionally, this article also considers the costs of implementing OTI technology on existing trains. It does not aim to predict the costs of the OTI technology for new generation trains or freight wagons as it would be hard to extrapolate the cost of a single component once it becomes a mandatory part of the whole train or wagon and is not sold individually.

The evaluation has considered two kinds of reference scenarios:

- corridors with a low train density and
- corridors with a high train density.

In the case of low-density corridors, the analysis has evaluated how the additional costs needed for OTI technology relate to the costs that can be saved through the reduction of trackside infrastructure on specific rail lines.

In the case of high-density corridors, the additional benefit of capacity increase has been determined by means of a microscopic simulation in addition to the cost comparison. However, the capacity increase has not been converted into monetary terms, since the effects would have to be weighted by each railway operator.

### 2 Scenarios and approaches

The analysis has been performed on the basis of real infrastructure data. The low-density scenario's focus lies on the shift of the TI technology from the infrastructure onto the trains. This results in a reduction of infrastructure costs through the removal of trackside equipment and the subsequent cessation of maintenance, energy

Reinvestitionskosten sowie zu einer Erhöhung der Zugkosten durch die OTI-Komponenten.

Bei den Szenarien mit hoher Zugdichte liegt ein weiterer Schwerpunkt auf der möglichen Kapazitätssteigerung, wenn mit Moving Block gefahren wird, wofür unter anderem die OTI-Technologie eine Voraussetzung ist.

Es wurden zwei Szenarien mit Mischverkehr und hoher Auslastung untersucht (Offenburg–Freiburg in Deutschland und ein Abschnitt der West Coast Main Line (WCML) in Großbritannien) sowie die Cambrian Line in Wales als Beispiel für eine Nebenstrecke.

Die Strecke Offenburg–Freiburg liegt im Südwesten Deutschlands. Sie wurde aufgrund ihrer Lage auf dem Rhein-Alpenkorridor zwischen Rotterdam und Genua ausgewählt, einem der wichtigsten Güterverkehrskorridore Europas, sowie wegen der strategischen Lage für den Personenverkehr zwischen Frankfurt, Stuttgart und der Schweiz.

Die WCML ist der wichtigste Güterverkehrskorridor in Großbritannien, der die Insel durch den Eurotunnel mit dem europäischen Festland verbindet. Sie verläuft zwischen London, Birmingham, Liverpool, Manchester und Glasgow und ist somit auch im Personenverkehr hoch ausgelastet. Da die gesamte WCML für eine detaillierte Simulation zu lang ist, wurde ein geeigneter Abschnitt nördlich von Crewe ausgewählt, wo die WCML von einer viergleisigen in eine zweigleisige Strecke übergeht.

Als Beispiel für eine Nebenstrecke wurde die Cambrian Line analysiert. Bei dieser Linie handelt es sich ausschließlich um eine regionale Personenverkehrsstrecke, die von Shrewsbury bis zum Knoten Dovey durch Wales verläuft und sich dann in eine nördliche Strecke nach Pwllheli und eine südliche nach Aberystwyth teilt. Sie ist besonders geeignet, da hier ETCS Level 2 bereits installiert ist.

### 3 Kostenanalyse

#### 3.1 Methodik der Lebenszykluskosten (LCC)

Zur Bewertung der Kostenverlagerung wurde eine LCC-Analyse auf der Grundlage des Nettobarwertes (Net Present Value – NPV) durchgeführt. Der LCC-Ansatz ist hilfreich für die Bewertung von Technologien mit langer Lebensdauer. Einmal implementiert, können sie die Funktionalität der Infrastruktur für mehrere Jahrzehnte definieren.

Bei der LCC-Berechnung werden alle maßgeblichen Kosten über die Lebensdauer einer Technologie berücksichtigt. Wenn verschiedene Technologien gegeneinander evaluiert werden, erfolgt die Berechnung mindestens über den längsten Lebenszyklus. Der in dieser Analyse verwendete Bezugszeitraum lehnt sich an die Empfehlung der Europäischen Kommission für den Schienenverkehr von 30 Jahren an [1].

Um alle Kosten, die zu verschiedenen Zeitpunkten anfallen, zusammenzufassen, sollten die Kosten diskontiert und auf einen gemeinsamen Zeitpunkt bezogen werden [2]. Für diese Analyse werden alle Kosten auf den heutigen Zeitpunkt ( $t=0$ ) diskontiert:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t}$$

Formel 1: Berechnung des NPV

mit  $B_t$  = Nutzen im Jahr  $t$ ,  $C_t$  = Kosten im Jahr  $t$ ,  $T$  = Lebensdauer des Projekts,  $i$  = Zinssatz im Jahr  $t$ .

Der Zinssatz hat einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der LCC. Er berücksichtigt, dass derselbe Geldbetrag gegenwärtig bedeutender ist als in der Zukunft. Je höher der Zinssatz, desto niedriger ist also der Wert der zukünftigen Nutzen und Kosten [2].

and reinvestment costs for these components, but also in an increase in train costs due to the new OTI components.

An additional focus in the high-density scenarios involves the benefits that can be gained through a capacity increase on the line when using the moving block functionality for which OTI is an enabler.

Three scenarios have been chosen for the performance of the cost calculations for different TI technologies on real life corridors: two high-density mixed lines, one between Offenburg and Freiburg in Germany and a section of the West Coast Main Line (WCML) in the UK, as well as the low-density Cambrian line in Wales.

Offenburg–Freiburg is located in south-west Germany. It has been chosen due to its location as part of the Rhine-Alpine corridor between Rotterdam and Genoa, which is one of the main freight corridors through Europe, as well as for its strategic location for passenger transport between Frankfurt, Stuttgart and Switzerland.

The WCML is the major freight corridor in Great Britain connecting the island with the European mainland through the Eurotunnel. Running between the cities of London, Birmingham, Liverpool, Manchester and Glasgow, it is also a high-density line for passenger traffic. As the whole WCML is too long for a detailed simulation, a suitable section has been decided upon. This section covers the area north of Crewe where the WCML changes from a four track line coming out of Birmingham into a two track line.

The Cambrian Line has been analysed for the low traffic density scenario. This line is a regional passenger line only, running from Shrewsbury to Dovey junction through Wales and splitting at Dovey junction into a northbound line to Pwllheli and a southbound line to Aberystwyth. This line is especially suitable as ETCS Level 2 has already been installed on it.

### 3 The cost analysis

#### 3.1 The Life Cycle Cost (LCC) methodology

An LCC analysis based on the Net Present Value (NPV) approach has been performed in order to evaluate the shift in costs. The LCC approach is useful for assessing technological implementations with a long service life. Once implemented, they can define the functionality of the infrastructure for several decades.

The LCC calculation takes all the relevant costs throughout the technology's service life into account. When different technologies are evaluated against each other the calculation is performed over the course of the longest common life cycle at a minimum. The reference period used in this analysis is based on the European Commission's recommendation of 30 years for rail [1].

In order to sum up all the costs that occur at different points in time over a long time span (e.g. the lifespan of railway infrastructure), the costs should be discounted and related to a common point in time. For this analysis, all the costs have been calculated to the present time ( $t=0$ ) [2]:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t}$$

Equation 1: The calculation of the NPV

Where  $B_t$  = benefits in the year  $t$ ,  $C_t$  = costs in the year  $t$ ,  $T$  = the lifespan of the project,  $i$  = the discount rate in the year  $t$ .

The value of the discount rate has a significant influence on the result of the LCC. It takes into account the fact that the same sum of money is more significant now than in the future. As such, the higher the discount rate, the lower the value of the future benefits and costs [2].

Ein in Europa üblicher Abzinsungssatz liegt zwischen 1,7 % – 3,5 % für lange Infrastrukturprojekte bei einem Bezugszeitraum von 30 Jahren, wie oben angegeben. In dieser Analyse wurde ein Zinssatz von 3 % verwendet [3, 4, 5].

### 3.2 Kostenrelevante Faktoren

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen für Personen- und Güterzüge sowie für verschiedene Unterklassen von Güter- und Personenzügen wurden in X2Rail-2 zwei Produktklassen entwickelt. Der Hauptunterschied besteht darin, dass Klasse 1 Züge mit einem verkabelten Kommunikationsnetz berücksichtigt, während Klasse 2 eine Lösung für Züge bietet, die eine drahtlose Lösung benötigen.

Ein kurzer Überblick über die Komponenten, die für diese Analyse berücksichtigt wurden, ist in Tab. 1 dargestellt. Weitere Einzelheiten zu den einzelnen Produktklassen sind in den Ergebnissen des X2Rail-2-Projekts zu finden [6].

In einem zweiten Schritt wurden die funktionalen On-Board-Module für jede Produktklasse entsprechend den Kategorien Kommunikationsnetzwerk, OTI-Master- und OTI-Slave-Gerät definiert. Die verschiedenen Unterkategorien der Produktklasse 1 sind drahtgebundene Lösungen, die in der späteren Analyse für Hochgeschwindigkeits- und Regionalzüge verwendet werden.

Bei Güterzügen wurde für die Kostenberechnung die Lösung 2A angenommen. Diese kann jedoch für jeden Korridor und die jeweils darin verkehrenden Züge angepasst werden.

Wie in der Methodik dargestellt, wurden die Lebensdauer jeder Komponente sowie alle relevanten LCC durch Diskussionen mit Experten verschiedener Eisenbahnverkehrsunternehmen ermittelt. Dabei wurden die Kosten für die Ausrüstung aller Züge der gewählten Szenarien mit OTI unter Verwendung des NPV-Ansatzes berechnet. Diese sind noch vorläufig, da sich die OTI-Produkte, die zur Ableitung der Kostenkomponenten und Werte verwendet werden, noch in der Entwicklung befinden. Um die Annahmen zu Kosten und Anzahl zu bewerten, wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

### 3.3 Analyse und Annahmen

In einem ersten Schritt wurden die obsoleten Infrastrukturkomponenten analysiert. Dazu wurden die Anzahl der Infrastrukturanlagen, die Lebensdauer, die Investitionsausgaben (CapEx) sowie die Betriebsausgaben (OpEx) erhoben und über 30 Jahre mit 3 % diskontiert. Bild 1 zeigt die Kosten eines solchen Vermögenswerts über seine Lebensdauer mit einer Anfangsinvestition zu Beginn, Reinvestitionen für Teile mit kürzerer Lebensdauer sowie OpEx.

Die Kostenberechnung für die Züge, die mit der OTI-Technologie ausgerüstet werden müssen, ist jedoch komplizierter, da die meisten Züge nicht ausschließlich in den gewählten Szenarien verkehren, sondern in einem größeren Netz eingesetzt werden. Die Festlegung einer Anzahl für die Regional- und Güterzüge, die mit der OTI-Vorrichtung ausgerüstet werden, ist jedoch entscheidend, um vergleichbare Kosten für beide TI-Technologien erzielen zu können.

A common discount rate in Europe lies between 1.7 % and 3.5 % for long infrastructure projects using a reference period of 30 years as stated above. This analysis has used a discount rate of 3 % [3, 4, 5].

### 3.2 The cost-relevant elements

The OTI technology has been analysed in relation to its cost components in order to compare the two approaches of verifying train integrity.

Due to different requirements for passenger and cargo trains, as well as for different subclasses of cargo and passenger trains, different product classes have been developed in X2Rail-2 to account for these different needs.

The main difference between the two product classes is that product class 1 accounts for trains with a wired communication network, while product class 2 offers a solution for trains that are not wired and thus need a wireless solution.

A short overview of the product classes and the respective components considered for this analysis is presented in tab. 1. More details on each product class can be found in the deliverables of the X2Rail-2 project [6].

In the second step, the functional on-board modules were defined for each product class according to the Communication Network and OTI Master and OTI Slave Device categories.

The different subcategories in product class 1 are wired solutions used in the later analysis for high speed and regional trains.

All the freight trains in the analysis have been assumed to use solution 2A for the purposes of the cost calculation. This can however be individually adapted for each corridor and the solution of the trains running within.

As described in the approach, the lifespan of each component and all the relevant LCC has been obtained through discussions with experts from different railway companies in order to calculate the costs for equipping all the trains in the chosen scenarios with OTI using the NPV approach. There is, however, still some uncertainty, as the OTI products used to derive the cost components and values are still in the development phase. Sensitivity analyses have been performed in order to evaluate the assumptions taken for the costs and numbers.

### 3.3 The analysis and assumptions

The first step analysed the infrastructure components that have become obsolete. Therefore, the number of the infrastructure assets, the lifespan, the capital expenditure (CapEx) and the operational expenditures (OpEx) have been collected and discounted at 3 % over 30 years. Fig. 1 shows the cost of such an asset over its lifespan with the initial investment at the start, reinvestment for parts with a shorter life span and the OpEx.

However, the cost calculation for trains that need to be fitted with OTI technology is more complicated as most trains do not

Overview components of the OTI system					
Product class	Product specification	Hardware	Software	Communication network	energy harvest
1	A	OTI master	yes	wired	-
	B	OTI master, OTI slave	yes	wired	-
2	A	OTI master, OTI slave	yes	wireless	-
	B	OTI master, OTI slave	yes	wireless	Yes

Tab. 1: Komponenten der OTI-Technologie

Tab. 1: OTI technology components

Quelle / Source: XXX



- Alle Personen- und Güterzüge, die die Szenarien durchfahren, wurden mit ihrer Gesamtstreckenlänge und dem Anteil, der innerhalb des Szenarios verläuft, ermittelt.
- Die für das Betriebsprogramm relevante Flottengröße wurde dann unter Berücksichtigung der Züge pro Spitzenstunde je Richtung für Personenzüge und der durchschnittlichen Anzahl von Zügen je Richtung für Güterzüge sowie der Zeit für Hin- und Rückfahrt einschließlich Wendezeit, Dispositionsreserve sowie Instandhaltungsreserve, berechnet.
- Das Verhältnis der Gesamtkilometer jedes Zuglaufs und der Szenariokilometer jedes Zuglaufs wird verwendet, um die dem Szenario entsprechenden Kosten zu ermitteln.

### 3.4 Ergebnis

Für die Berechnung der LCC der Infrastruktur hängt die Kosteneinsparung durch Wegfall von Achszählern und Gleisstromkreisen davon ab, welche Rückfallebenen die Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) einhalten wollen. Da diese Entscheidung von jedem EIU abhängt, wurde die Kostenanalyse mit unterschiedlichem Reduzierungsgrad der streckenseitigen Ausrüstung durchgeführt, was in den Ergebnissen in Bild 2 dargestellt ist und bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss.

Für die drei Szenarien wurde mit einem Verbleib von Achszählern und Gleisstromkreisen in Höhe von 0%, 10%, 30% und 50% gerechnet.

Im Szenario in Wales verkehren auf der Cambrian Line keine Güterzüge und nur ein Personenzug pro Stunde. Das bedeutet, dass wenige Züge mit der neuen OTI-Technologie ausgerüstet werden müssten. Gleichzeitig ist teure streckenseitige Infrastruktur verbaut. Daher können beim Umstieg auf die Zugvollständigkeitskontrolle über On-Board Units (OBU) Kosten eingespart werden, selbst wenn 50 % der streckenseitigen Elemente erhalten bleiben würden. Auf den beiden Mischverkehrsstrecken mit hoher Zugdichte ist die Anzahl der Züge, die mit der neuen Technologie ausgerüstet werden müssen, deutlich höher. Dies hat zur Folge, dass das Kostenverhältnis nur dann positiv ist, wenn die Mehrheit der streckenseitigen Elemente entfernt werden kann.

## 4 Kapazitätsanalyse

### 4.1 Methodik

Die OTI-Technologie ermöglicht es den Zügen, in einem absoluten Bremswegabstand (Moving Block) zu fahren, wodurch sich geringe Mindestzugfolgezeiten ergeben und dies im Vergleich zu langen Blockabschnitten höhere Kapazität bietet. Die gleiche Kapazität könnte sonst nur erreicht werden, indem Blöcke durch zusätzliche kostspielige streckenseitige Ausrüstung in kürzere Abschnitte aufgeteilt würden.

Um die Kapazitätsänderung zu ermitteln, die durch den Wechsel zu Moving Block erreicht werden kann, wird eine mikroskopische Simulation genutzt, da detaillierte fahrdynamische Modelle der Züge sowie der Infrastruktur (z. B. Weichenstellungen) benötigt werden. Hierfür wird die Software OpenTrack der Schweizer Firma OpenTrack Railway Technology Ltd. verwendet, da es die Möglichkeit bietet, Moving Block zu simulieren [7].

### 4.2 Infrastrukturelemente und Betriebsprogramm

Für die Kapazitätsanalyse wurde die Bahnstrecke Freiburg – Offenburg simuliert. Sie wurde mit ETCS Level 2 (L2) ohne streckenseitige Signalisierung und ETCS Level 3 (L3) mit Moving Block modelliert. Zunächst wurde die Infrastruktur inklusive Streckenlänge, Gleisanzahl, Lage und Anzahl der Signale, Achszähler, Weichen und Bahnhöfe grafisch dargestellt und um weitere Parameter wie Stei-

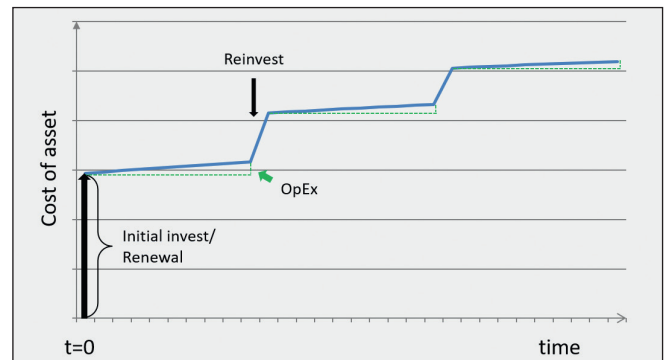


Bild 1: LCC der Infrastrukturanlagengüter

Fig. 1: The LCC for infrastructure assets

Quelle / Source: eigene Darstellung / own source

run exclusively in the chosen scenarios, but are used within a wider network. It is, however, crucial to be able to gain comparable costs for both TI technologies in order to determine a number for the regional and freight trains that need to be equipped with OTI devices.

A network analysis has been performed in three steps for the two high-density mixed line scenarios in order to resolve this approximation of the train numbers.

- All the passenger and freight trains running through the scenarios have been listed together with their total line length and the share that runs within the scenario.
- The fleet size that is relevant to run the total service has then been calculated taking into account the trains per peak hour per direction for passenger trains and the average number of trains per direction for freight trains, the time per return trip including a turn-around time, a disposition reserve, as well as a maintenance reserve.
- The ratio of the total kilometers of each train service and the scenario kilometer of each train service has been used to determine the cost corresponding to the scenario.

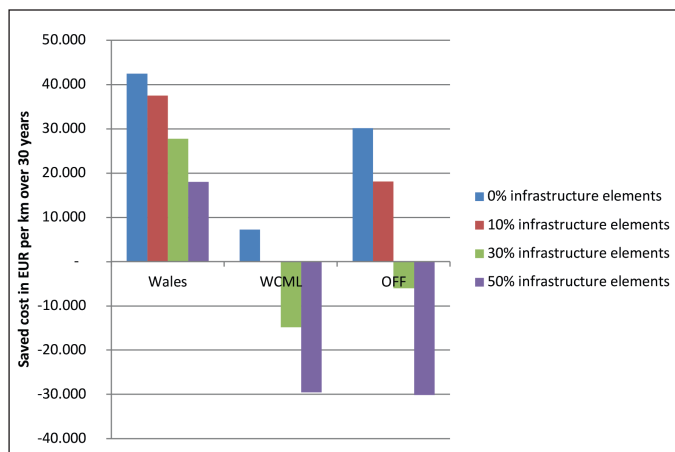
### 3.4 The results

For the LCC infrastructure calculation, the reduction of axle counters and track circuits and therefore the cost saving depends on the fall-back level the railway undertakings (RU) want to keep. As this decision will depend on each RU, the cost analysis has been performed with different levels of trackside equipment reductions as depicted in the results contained in fig. 2: The sensitivity analysis and this has to be considered when interpreting the results.

It has been calculated with axle counters and track circuits at the amount of 0%, 10%, 30% and 50% remaining on the infrastructure for the three scenarios.

The Cambrian line scenario in Wales involves no freight trains and only one passenger train service every hour. This means that not many trains will have to be fitted with the new OTI technology. At the same time, the line contains a lot of trackside infrastructure which is expensive. Therefore, costs could be saved in the case of a change in the train integrity solution using on-board units (OBU), even if 50 % of the trackside elements remained.

The number of trains that would need to be equipped with the new technology on the two high-density mixed lines is much higher. This has resulted in the cost ratio only being positive when most of the trackside elements can be removed.



**Bild 2: Sensitivitätsanalyse: Umfang der streckenseitigen Ausrüstung**

Fig. 2: The sensitivity analysis: the amount of trackside equipment

Quelle / Source: eigene Darstellung / own source

gungen und Streckengeschwindigkeit ergänzt. Schließlich wurden Reaktions- und Kommunikationszeiten festgelegt wie Weichenstellzeiten sowie Fahrstraßenbilde- und -auflösezeiten.

Im ETCS L2- und ETCS L3-Szenario müssen mehrere Werte für die Kommunikationszeiten berücksichtigt werden, die den Abstand zwischen zwei Zügen bestimmen, damit der nachfolgende Zug immer rechtzeitig bremsen und zum Stillstand kommen kann. Es wurden folgende Zeitkomponenten berücksichtigt [7, 8]:

- Kommunikation zwischen Stellwerk und Radio-Block-Center (RBC)
- Verarbeitungszeit im RBC
- Kommunikation zwischen RBC und Zug
- Bearbeitungszeit im Zug
- Reaktionszeit Triebfahrzeugführer.

Diese Werte hängen sowohl von der Prozesszeit des OTI-Endprodukts als auch von der des RBC sowie zwischen beiden ab. Insgesamt wurden in dem Modell 14 Sekunden verwendet, um die oben genannten Kommunikations- und Reaktionszeiten abzudecken.

Das Betriebsprogramm besteht aus Angaben zur Anzahl und Art der eingesetzten Züge aus dem Sollfahrplan an einem Mittwoch im Oktober 2019 in der Hauptverkehrszeit 6.00 – 9.00 Uhr für Personenzüge einschließlich Ankunfts- und Abfahrtszeiten, Reihenfolge der Züge, Anschlusszüge und Zugstrecken. Güterzüge wurden anschließend in entsprechenden freien Slots in den Fahrplan eingelegt. Die Anzahl der Güterzüge, die in dieser Spitzenzeit verkehrten, wurde anhand der Daten der öffentlichen Lärmüberwachung ermittelt. Zur Berechnung der Beschleunigung und Verzögerung wurden die Masse für Triebfahrzeuge und Güterwagen sowie Zugkraftdiagramme und Zugwiderstandsparameter verwendet.

Für die Bewertung der Kapazität wird der UIC-Code 406 verwendet, der die Kapazität wie folgt definiert [9]:

$$\text{Belegungsgrad [\%]} = \frac{\text{Belegungszeit}}{\text{festgelegte Zeit}} \times 100$$

Für die Kapazitätsanalyse wurden die Spitzenstunden von 6:30 Uhr – 8:30 Uhr verwendet.

Die Belegungszeit für jeden Streckenabschnitt unterscheidet sich zwischen ETCS L2 und ETCS L3. Für ETCS L2 umfasst sie die Annäherungszeit an den Block und die Kommunikationszeit für die Einholung einer Fahrterlaubnis, die Zeit für die Durchfahrt durch den Block in voller Länge und die Fahrstraßenauflösezeit. Für ETCS L3 umfasst die Belegungszeit die mit den Bremskurven kontinuierlich berechnete Strecke bis zum Stillstand.

## 4 The capacity analysis

### 4.1 The methodology

OTI technology enables the trains to drive at an absolute braking distance (moving block), thereby decreasing the distance between the trains and thus gaining additional capacity especially when compared to long fixed block sections. Without OTI technology, the same capacity can be achieved by decreasing the length of each fixed block section on the infrastructure with costly additional trackside equipment.

A microscopic simulation has been used to evaluate the amount of capacity that can be gained by switching to a moving block approach, because detailed models of the trains and the infrastructure (e.g. the switch positions) are needed.

The OpenTrack simulation tool from the Swiss company OpenTrack Railway Technology Ltd. has been used for the microscopic simulation, as it provides the option of applying moving block operations [7].

### 4.2 Infrastructure elements and the operating program

The Freiburg-Offenburg railway line has been plotted using Open Track for the capacity analysis. It has been modelled with ETCS Level 2 (L2) without lineside signalling and ETCS Level 3 (L3) with moving block. First, the infrastructure was plotted, including the line length, the number of tracks and the location and number of the signals, axle counters, switches and stations. Other parameters describing the infrastructure were then added, mainly gradients and line speeds. Finally, the reaction and communication times were set, such as the switch times and the route setting and release times.

In the ETCS L2 and ETCS L3 scenarios, multiple communication time values which determine the distance between two trains, so that the following train is always able to brake and come to a standstill without crashing into the preceding train, have to be taken into account. Desktop research has been done to determine the relevant time components needed [8, 9]:

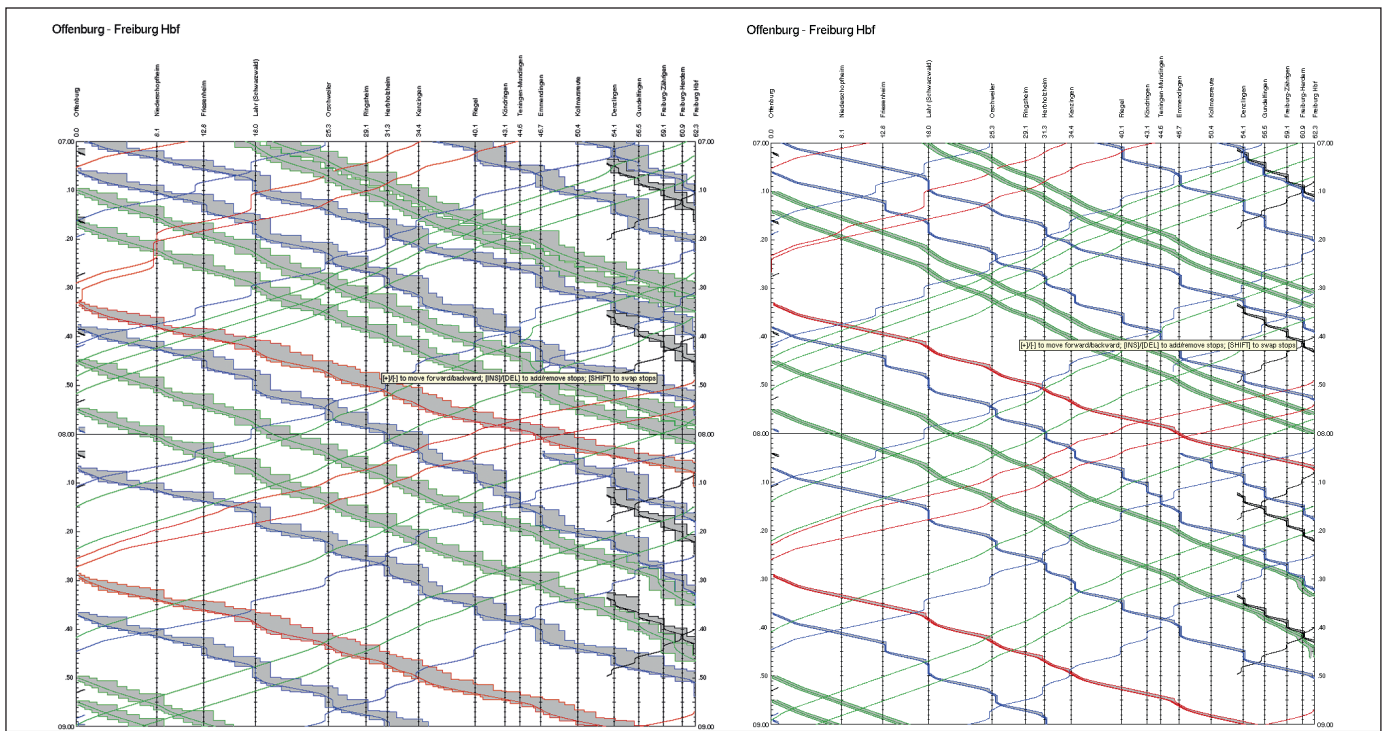
- communication between the interlocking and the radio-block-center (RBC)
- the processing time at the RBC
- communication between the RBC and the train
- the processing time in the train
- the driver reaction time.

These values do, however, depend on the final OTI product's processing time, as well as the RBC processing time and the time between the two. A total of 14s has been used in the model to cover the aforementioned communication and reaction times.

The operational program consists of the values for the number and types of trains used from the planned timetable on a Wednesday in October 2019 during the morning passenger train peak between 6 am and 9 am, including the arrival and departure times, the order of the trains, the connecting trains and the train routes. Freight trains were then added to any free slots in the timetable. The number of freight trains running during the morning peak was determined from public noise monitoring data. The mass of the locomotives and wagons and the tractive effort diagrams and train resistance parameters have been used to calculate the acceleration and deceleration.

UIC Code 406 has been used to evaluate the capacity and it defines capacity as [10]:

$$\text{Capacity Consumption [\%]} = \frac{\text{Occupancy Time}}{\text{Defined Time Period}} \times 100$$



**Bild 3: Zugdiagramm Szenario Offenburg – Freiburg : fester Blockabstand zu Moving Block**

Fig. 3: A train diagram of the Offenburg – Freiburg fixed block and moving block approaches

Quelle / Source: eigene Darstellung / own source

### 4.3 Ergebnis

Der Belegungsgrad wird für das Szenario Offenburg – Freiburg in einem Bildfahrplan sowohl für ETCS L2 als auch für ETCS L3 visualisiert (Bild 3).

Obwohl die Blockdistanz in diesen Gebieten mit 1 – 1,5 km bereits gering ist, zeigen die Bildfahrpläne eine Verbesserung der Kapazität zwischen fixem Block und Moving Block.

Für Mischverkehrsstrecken, wie es bei beiden Szenarien der Fall ist, schlägt die UIC 406 Werte von 75 % für die Spitzenstunde vor. Unter Verwendung der obigen Formel zeigt der Belegungsgrad einen Wert von ~80 % für ETCS L2 mit festen Blöcken. Dies liegt über dem von der UIC empfohlenen Wert. Für ETCS L3 mit Moving Block liegt der Belegungsgrad bei etwa 55 %.

Die kritischen Bereiche im Szenario Offenburg – Freiburg liegen vor Freiburg und vor Offenburg, wo zusätzliche Regionalverkehrslinien auf die Hauptstrecke münden. Vor Offenburg schränkt der Umstand, dass einige Güterzüge den Gegenverkehr queren müssen, um für den Lokführerwechsel zu halten, die Kapazität zusätzlich ein.

Auch wenn der Kapazitätsgewinn nicht monetarisiert wurde, da er nur teilweise der OTI-Technologie zugeschrieben werden kann, ist er ein wichtiger Vorteil. Es zeigt, dass es neben den direkten Kosten zusätzliche Faktoren gibt, die bei einem wirtschaftlichen Vergleich zwischen fahrzeugseitigen und streckenseitigen Infrastrukturfunktionalitäten zu berücksichtigen sind.

## 5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Zugvollständigkeitskontrolle mit streckenseitiger Ausrüstung wurde mit der Zugvollständigkeitskontrolle mit fahrzeugseitigen Geräten verglichen. Für Strecken mit geringer Auslastung zeigen die Ergebnisse, dass die Zugvollständigkeitskontrolle mit OBU aufgrund der begrenzten Anzahl der auszurüstenden Züge und der hohen Kosten für die Infrastrukturelemente wirtschaftlicher ist.

The defined time period for the capacity analysis in this analysis is the morning peak between 6:30 am and 8:30 am.

The occupancy time for each line section differs between ETCS L2 and ETCS L3. For ETCS L2, it includes the time to approach the block and the communication time for receiving a movement authority, the time to travel through the full length of the block and the route release time. For ETCS L3, the occupancy time includes the distance to stop calculated continuously with the braking curves.

### 4.3 The results

The capacity consumption has been visualised for the Offenburg – Freiburg scenario in a train diagram for both ETCS L2 and ETCS L3 (fig. 3).

Even though the block distance in these areas is already very short at 1-1.5 km, the train diagrams show an improvement in capacity between fixed block and moving block operations.

UIC 406 has proposed values of 75 % for the peak hour on mixed traffic lines as in the case of both scenarios. When using the aforementioned formula, the capacity consumption has shown a value of ~80 % for ETCS L2 with fixed blocks. This is above the recommended value of the UIC. The capacity consumption is around 55 % for ETCS L3 with moving block operations.

The critical areas in the Offenburg – Freiburg scenario are located in front of Freiburg and Offenburg where additional regional train lines merge onto the main line. An additional factor that limits the capacity in front of Offenburg involves the fact that some freight trains need to cross through the oncoming traffic as they need to stop for train driver changes.

Even though the gain in capacity has not been monetised as it can only be partially attributed to OTI technology, it remains an important benefit. It shows that there are additional factors besides direct costs that need to be considered when making an economic comparison between on-board and trackside infrastructure functionalities.



Bei Mischverkehrsstrecken mit hoher Auslastung lag der Break-even-Point der Technologien auf einem Niveau der verbleibenden streckenseitigen Elemente von 10 – 25 %.

Da das fahrzeugseitige Zugvollständigkeitssystem im Rahmen des derzeit laufenden X2Rail-4-Projekts zu einem Prototyp entwickelt werden soll, mussten bei der Kostenanalyse Annahmen verwendet werden, die auf vergleichbaren bestehenden Komponenten basieren. Darüber hinaus wurde das Projekt um weitere Analysen erweitert, um zu definieren, ob die OBU nur die Funktionalität der Überwachung der Zugintegrität abdecken wird oder ob auch andere Funktionalitäten wie die Bestimmung der sicheren Zuglängen durchgeführt werden sollen. Die Gleisstromkreise und Achszähler auf der Infrastruktur überwachen jedoch nicht nur die Zugintegrität, sondern liefern auch den Standort des Zuges. Wenn streckenseitige Elemente entfernt werden, muss berücksichtigt werden, dass die Funktionalität der sicheren Zugortung und die Bestimmung der Zuglängen sicherheitsrelevante Informationen sind, die bereitgestellt werden müssen. Der monetäre Nutzen der Entfernung von Achszählern und Gleisstromkreisen kann daher nicht allein den Kosten für die fahrzeugseitige Zugvollständigkeitseinheit zugeschrieben und gegenübergestellt werden.

Für die Annahmen zu den Kosten für die OTI wurden Werte angenommen, die verwendet werden, um einen bestehenden Zug oder Güterwagen mit der OTI-Technologie auszustatten. Es wird jedoch angenommen, dass diese Werte höher sind als bei der Ausstattung eines neuen Zuges oder Güterwagens mit der gleichen Technologie. Im Nachfolgeprojekt X2Rail-4 wird eine Analyse zur Technologiemigration der OTI durchgeführt, die sich mit Details wie der Zeitspanne zwischen der Ausrüstung der Züge mit der OTI-Technologie und der Reduzierung der Infrastrukturelemente sowie der Tatsache befasst, dass Kosten und Nutzen nicht denselben Stakeholder betreffen. ■

## 5 Conclusion and further work

Train integrity control with trackside equipment has been compared to the train integrity control with OBU. For low-density lines, the results have shown that train integrity control with OBU is more economical due to the limited amount of trains that need to be equipped and the high costs for the infrastructure elements.

For high-density mixed lines, the break even point between both technologies under the stated assumptions was at a level of 10 – 25 % of remaining trackside elements.

As the on-board train integrity system will be developed to a prototype within the currently running X2Rail-4 project, the cost analysis has had to use assumptions based on comparable existing components. In addition, the project has also been enhanced with a further analysis to define, whether the OBU will only cover the functionality of train integrity monitoring or whether other functionalities, such as determining the safe train length, will also be performed. However, the track circuits and axle counters on the infrastructure do not solely monitor train integrity, but also provide information about the location of the train. When trackside elements are removed, it is necessary to take into account that safe train positioning and determining the train length involve safety relevant information that needs to be provided. The monetary benefit of removing the axle counters and track circuits can therefore not be solely attributed and calculated against the cost of the on-board train integrity unit.

With regard to the OTI cost assumptions, values have been used that are expected to cover the installation of OTI technology on an existing train or freight wagon. It is acknowledged, however, that these values will be higher than those for equipping a new train or freight wagon with the same technology. As for future trains, however, it is unlikely that OTI technology will be sold and fitted individually, meaning that it is not easily possible to derive a value for an individual component.

The X2Rail-4 follow-up project will perform an analysis on the OTI technology migration that will cover details such as the time gap between fitting the trains with OTI technology and reducing the infrastructure elements, as well as the fact that the costs and benefits do not affect the same stakeholder. ■

## LITERATUR | LITERATURE

- [1] European Commission, „Guide to Cost-Benefit analysis of investment Projects“, Luxembourg, 2015
- [2] Nellthorp, J.: „The principles behind transport appraisal“, in the Routledge Handbook of Transport Economics, 2017, pp. 176-208
- [3] DfT, „TAG data book“, 2018. [Online]. Available: <https://www.gov.uk/government/publications/tag-data-book>
- [4] BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Methodology Manual for the Federal Transport Infrastructure Plan 2030“, 2016
- [5] Trafikverket, „Summary of the Swedish debate on the discount rate“, 2014. [Online]. Available: [https://www.trafikverket.se/contentassets/709c27f38b2f46499a5a157c77a323a2/2014/trv\\_2014\\_summary\\_of\\_the\\_swedish\\_debate\\_on\\_the\\_discount\\_rate.pdf](https://www.trafikverket.se/contentassets/709c27f38b2f46499a5a157c77a323a2/2014/trv_2014_summary_of_the_swedish_debate_on_the_discount_rate.pdf)
- [6] D4.1 Train Integrity Concept and Functional Requirements Specifications - X2Rail-2 WP4 – 19th February 2019
- [7] Huerlimann, D.; Nash, A.: „Open Track-Simulation of Railway Networks Version 1.9“, [Online]. Available: [http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack\\_e/opentrack\\_e.html](http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack_e/opentrack_e.html)
- [8] ERTMS User Group, „Introduction to ETCS breaking curves“, 2016
- [9] ERTMS User Group, „Description of the brake curve calculation“, Brussels, 2007
- [10] UIC, „UIC Leaflet 406 - IV Operating“, Paris, 2013

## AUTOREN | AUTHORS

### Alessa Eckert, M. Sc.

Wiss. Mitarbeiterin – Bewertung des Verkehrs /  
Scientific staff – Evaluation of Transportation  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. / German Aerospace Center  
Institut für Verkehrssystemtechnik / Institute of Transportation Systems  
Anschrift / Address: Rutherfordstr. 2, D-12489 Berlin  
E-Mail: [alessa.eckert@dlr.de](mailto:alessa.eckert@dlr.de)

### Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Florian Brinkmann

Gruppenleitung – Qualität und Wirtschaftlichkeit /  
Teamleader – Quality and Economics  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. / German Aerospace Center  
Institut für Verkehrssystemtechnik / Institute of Transportation Systems  
Anschrift / Address: Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig  
E-Mail: [florian.brinkmann@dlr.de](mailto:florian.brinkmann@dlr.de)

### Benedikt Scheier, M. Sc.

Wiss. Mitarbeiter – Bewertung des Verkehrs /  
Scientific staff – Evaluation of Transportation  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. / German Aerospace Center  
Institut für Verkehrssystemtechnik / Institute of Transportation Systems  
Anschrift / Address: Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig  
E-Mail: [benedikt.scheier@dlr.de](mailto:benedikt.scheier@dlr.de)